

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ОСТАШКО ІГОР ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 621.926.5

**ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІДЦЕНТРОВОГО МЛИНА ТА
ПРОЦЕСІВ ПОДРІБНЮВАННЯ ТВЕРДИХ ЗАЛИШКІВ ПІРОЛІЗУ
ЗНОШЕНИХ ШИН**

05.05.13 – машини та апарати хімічних виробництв

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі обладнання хімічних виробництв Державного вищого навчального закладу «Український державний хіміко-технологічний університет» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Виноградов Борис Володимирович,
Державний вищий навчальний заклад
«Український державний хіміко-технологічний університет», завідувач кафедри обладнання хімічних виробництв

Офіційні опоненти доктор технічних наук, професор
Карвацький Антон Янович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», професор кафедри хімічного, полімерного і силікатного машинобудування

доктор технічних наук, професор
Надуть Володимир Петрович,
Інститут геотехнічної механіки імені
М.С. Полякова Національної академії наук
України, завідувач відділу механіки машин і процесів переробки мінеральної сировини

Захист відбудеться «19» лютого 2019 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.05 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги 37, корп. 19, ауд. 201/1.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги 37.

Автореферат розісланий «18» січня 2019 року

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.002.05

 О. І. Іваненко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Накопичення великої кількості зношених автомобільних шин, що не піддаються природній деструкції, є однією з важливих проблем для екології та суспільства в Україні. Проблема утилізації відпрацьованих автомобільних шин останнім часом викликала зацікавленість громадськості та значної кількості приватних підприємців. Фундаментом для цього стало нагромадження величезних обсягів відпрацьованих шин, а також наявність економічно виправданого та технологічно простого способу їх утилізації методом піролізу. У результаті піролізу одержують рідкі й газоподібні вуглеводні, що використовуються як паливо, а також твердий залишок піролізу (ТЗП), котрий містить 80-90 % вуглецю. Вкрай вигідним з економічної точки зору є повторне використання твердого залишку як альтернативу промислового технічного вуглецю. Для застосування твердого залишку як технічний вуглець, необхідно здрібнити його до розмірів частинок близько 10 мкм. Оскільки клас близько 10 мкм відноситься до надтонкого подрібнення, вибір раціонального обладнання та його параметрів, що дають змогу отримати заданий клас продукту за найменших питомих енерговитрат, є перспективним науково-практичним завданням.

Таким чином, науково обґрунтований вибір параметрів відцентрового млина зі спеціальним робочим органом, що дає можливість подрібнювати ТЗП з мінімальними енерговитратами та розвантажувальним пристроєм, який дає змогу проводити первинну класифікацію подрібненого продукту, встановлення закономірностей споживання енергії залежно від конструкційних та технологічних параметрів млина, кінетики подрібнення, газо-механічних процесів руху гетерогенного середовища в робочій камері під час подрібнення та видалення готового продукту є актуальним науково-практичним завданням, яке має важливе значення для підвищення ефективності утилізації зношених шин та розвитку теорії розрахунку відцентрових млинів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок в Україні (Постанова Кабінету Міністрів України від 07.09.2011 р., № 942), а також згідно тематичних планів ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» і в межах науково-дослідної роботи (НДР). Дисертант, як виконавець брав безпосередню участь у виконанні НДР за темами «Розвиток теорії та створення нових енергозберігаючих способів, пристроїв та композиційних матеріалів в хімічній технології» (№ ДР 0108U001156), «Розробка обладнання для комплексної переробки гумових відходів у моторні палива» (№ ДР 0110U000044).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є аргументований вибір розмільного обладнання, наукове обґрунтування його основних конструктивно-технологічних параметрів, отримання кінетичних закономірностей процесу подрібнення, а також області ефективного використання тонкодисперсного ТЗП як технічного вуглецю.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані такі завдання:

1. дослідження різних типів і вибір раціонального обладнання для подрібнення твердого залишку піролізу;

2. наукове обґрунтування вибраного обладнання та розробка методики розрахунків його основних параметрів;

3. визначення кінетичних залежностей та обґрунтування технологічних параметрів процесу подрібнення ТЗП;

4. встановлення напрямків застосування подрібненого твердого залишку піролізу як технічний вуглець для наповнення гумотехнічних виробів та кераміки.

Об'єкт дослідження – процес подрібнення та видалення твердих вуглецевмісних матеріалів у відцентровому млині.

Предмет дослідження – конструктивно-технологічні параметри відцентрового млина для подрібнення залишків піролізу гумовмісних відходів та можливість застосування одержаного продукту як технічного вуглецю.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі використовувався комплекс апробованих методів дослідження, що включав: лазерно-дифракційний аналіз, електронну мікроскопію, оптичну мікроскопію та методи визначення адсорбції дибутилфталата подрібненого твердого залишку піролізу; адекватні математичні моделі, зв'язані системи рівнянь механіки суцільного середовища, апробований математичний апарат методів скінченних елементів та скінченних об'ємів; стандартні методи та обладнання для тензометричного дослідження; статистична та математична обробка експериментальних даних на базі прикладних комп'ютерних програм; експериментальні дослідження в лабораторних умовах у відповідних профільних підрозділах ДВНЗ УДХТУ та заводських лабораторіях для перевірки ефективності застосування подрібненого ТЗП.

Наукова новизна отриманих результатів. У результаті виконаних у дисертації досліджень вперше отримані такі наукові результати:

- на базі математичного моделювання отримано розподіл поля швидкості та траєкторії потоків гетерогенного середовища в помольній камери млина під час взаємодії його з робочим органом, що є необхідним для модернізації наявного і створення нового обладнання хімічних виробництв та дало змогу визначити залежність гранулометричного складу частинок на виході з млина від геометричних параметрів його проточної частини;

- встановлено залежність споживаної потужності на процес подрібнення матеріалу від конструкційних та технологічних параметрів, а також від розмірів частинок ТЗП у помольній камері: зокрема потужність в степені 0,3 залежить від середнього діаметру подрібнюваного матеріалу;

- визначено залежність крупності подрібненого матеріалу, що видаляється з помольної камери від відносної витрати повітря, яка дорівнює відношенню витрати повітря до об'єму помольної камери;

- отримано залежності зміни гранулометричного складу ТЗП від тривалості подрібнення та встановлено значення констант рівняння кінетики під час подрібнення у відцентровому млині та роторному апараті;

- встановлено залежності показників якості гумових виробів, таких як міцність на розрив, еластичність, опір роздиранню та стійкість до старіння від середнього діаметру частинок подрібненого ТЗП, які використовуються як заміник технічного вуглецю.

- вперше встановлено, що кутова швидкість потоку тонкодисперсного середовища, що знаходиться в площині обертання робочого органу

відцентрового млина лінійно залежить від його частоти обертання, при цьому коефіцієнт пропорційності для кожної точки потоку в залежності від її відстані до фронтальної поверхні робочого органу має своє значення, та коливається у межах 0,99-0,67.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено конструкцію відцентрового млина для подрібнення ТЗП та методику розрахунку його основних конструкційних та технологічних параметрів. Технічні рішення захищені патентами України на винаходи №№ 90631, 106127, 106773, 106773, 106780. Розроблено методику розрахунку потужності електродвигуна відцентрового млина для подрібнення ТЗП, в якій враховано геометричні параметри робочого органу, середній розмір частинок ТЗП та частота обертання ротора. З використанням числового скінченно-елементного аналізу виконано розрахунки робочого органу відцентрового млина на міцність. Розроблена методика дослідження динаміки відцентрового млина в період пуску. Розроблено нову рецептуру гумової суміші для виготовлення нашпальних прокладок (патент України на винахід № 108288). Доведена, можливість часткової заміни, до 50 %, технічного вуглецю П 803 на подрібнений ТЗП у рецептурі нашпальних прокладок рейкових шляхів за умови збереження фізико-технічних показників виробів у межах вимог чинної нормативної документації. Показано можливість підвищення на два порядки й більше діелектричної проникності гуми, в якій застосовується ТЗП. Результати дисертаційної роботи пройшли випробування та були передані на підприємство ТОВ «Інтер-ГТВ» (м. Біла Церква), що підтвердили промислову придатність розробок роботи.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи, що висвітлені в наукових положеннях, отримані особисто дисертантом. Дисертант особисто провів: аналіз джерел інформації, теоретичні та експериментальні дослідження, лабораторні випробування, обробку експериментальних даних, розробку методики розрахунку основних параметрів відцентрового млина, числове моделювання газодинаміки та розрахунок на міцність конструкції робочого органу. Постановку мети і завдань дослідження, обговорення результатів експериментів та висновків виконано разом з науковим керівником.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та отримали позитивну оцінку на: Всеукраїнській науково-технічній конференції студентів і молодих вчених «Молода Академія» (Дніпропетровськ, 2008 р., 2010 р.); III Міжнародній науково-технічній конференції «Хімія і сучасні технології» (Дніпропетровськ, 2009 р., 2011 р., 2013 р., 2015 р.); I-й Международной научно-практической выставке-форуме „Современные энерго - и ресурсозберегающие технологии. Проблемы и перспективы.” (Одесса, 2009 г.); 8-й Украинской с международным участием научно-технической конференции „Эластомеры: материалы, технология, оборудование, изделия” (Днепропетровск, 2010 г.); Міжнародній конференції «Форум гірників» (Дніпропетровськ, 2014 р.).

Публікації. Основні положення дисертації опубліковано у 27 друкованих працях, з них 12 статей у фахових виданнях, у тому числі 3 статті у закордонних виданнях, з них 1 стаття індексується у світових наукометричних базах даних і

системах, 7 патентів України на винахід, 8 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Структура і осяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел літератури і додатків. Загальний обсяг складає 172 сторінок. Обсяг основного тексту становить 148 сторінок, з яких площа 3 сторінок повністю зайнята таблицями і рисунками. Робота містить 10 таблиць і 86 рисунків, список використаних джерел літератури складається із 110 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання досліджень, викладено наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, надано відомості про зміст роботи, апробацію, публікації та особистий внесок автора.

У **першому розділі** виконано аналіз методів та технологій утилізації зношених автомобільних шин, окремо розглянуто процес піролізу, а також проведено аналітичний огляд розмельного обладнання, що може бути використано для подрібнення ТЗП.

Аналіз літературних джерел показав, що однією з важливих сучасних проблем промислово розвинених країн є утилізація та знешкодження твердих побутових відходів, що накопичуються у великій кількості і не піддаються природній деструкції. Вагому частку твердих побутових відходів займають відпрацьовані автомобільні шини. Так, за даними Державного автотранспортного науково-дослідного та проектного інституту, щорічний приріст відпрацьованих автомобільних шин на звалищах України складає близько 200 тис. т.

Одним із перспективних напрямків утилізації зношених шин є їх піроліз – термічна обробка без доступу кисню. Піроліз дає декілька цінних товарних продуктів, з утильної гуми отримують рідкий, газоподібний та твердий продукти. Газоподібний продукт як правило використовується для підтримки процесу піролізу, рідкий та твердий продукти використовують як паливо, а металевий корд для переплавки на металургійні комбінати. Твердий залишок піролізу містить 80-90 % вуглецю, 5-8 % золи, 3-12 % летких органічних складових. ТЗП найбільш раціонально повторно використовувати як замітник технічного вуглецю для наповнення еластомерів у виробництві гуми, керамічних та композиційних матеріалів. Таким чином може бути вирішено дві проблеми: перша – підвищення вартості твердого залишку піролізу, а відповідно і рентабельності самого процесу; друга – утворення альтернативного джерела технічного вуглецю для вітчизняних виробників гумотехнічних виробів, що в більшості своїй змушені купувати технічний вуглець за кордоном.

Оскільки твердий залишок піролізу по своїй дисперсності (20–50 мм) та однорідності не відповідає промисловим маркам технічного вуглецю, то виникає необхідність його надтонкого подрібнення.

Виходячи з можливих напрямків використання подрібненого ТЗП та аналізу поширеного розмельного обладнання, можна дійти висновку, що перспективним для подрібнення твердого залишку є електрогідро-імпульсна

технологія, роторно-імпульсний апарат, вертикальний кульовий та відцентровий млин.

У результаті проведеного літературного аналізу встановлено, що наразі відсутні роботи присвячені вибору обладнання для подрібнення ТЗП. Тому актуальним є науковий вибір обладнання, обґрунтування його параметрів, визначення кінетичних закономірностей процесу подрібнення, а також напрямків ефективного використання подрібненого ТЗП.

Таким чином, на основі літературного аналізу доведено актуальність та обґрунтовано мету і завдання дослідження.

Другий розділ дисертації присвячений дослідженню ефективності подрібнення твердого залишку піролізу в обраному розмельному обладнанні з метою визначення ступеня подрібнення, питомих енерговитрат та показника структурності. Аналіз ефективності кожного способу подрібнення виконувався за двома показниками: питомі енерговитрати та коефіцієнт адсорбції дибутилфталату (ДБФ), як узагальнюючий критерій дисперсності та поверхневої активності подрібненого ТЗП.

Проведено експеримент з подрібнення ТЗП в електро-гідроімпульсній (ЕГІ) установці. Основні параметри електричного розряду становили: напруга розряду $U=35$ кВ, сумарна ємність конденсаторів $C=0,9$ мкФ, енергія розрядного імпульсу склала $0,551$ кДж. Попередньо ТЗП було подрібнено механічним способом до класу менше 40 мкм. За результатами випробування показано, що ЕГІ спосіб надтонкого подрібнення твердого залишку піролізу має відносно високі питомі енерговитрати $0,72$ кДж/г, за його структурності 76 см³/100 г.

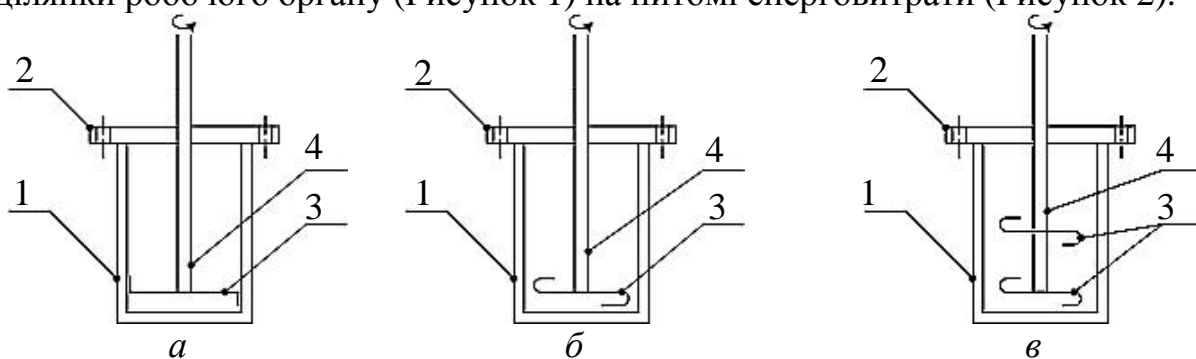
Вихідним матеріалом для дослідження подрібнення у роторно-імпульсному апараті (РІА) була суміш води та матеріалу у масовому співвідношенні 20 кг води та 1 кг ТЗП. Дисперсність вихідного твердого продукту була меншою за 100 мкм. Під час диспергування забезпечувалася найбільша інтенсивність кавітації, що супроводжувалась найбільшим звуковим ефектом. При цьому перепад тиску на РІА складав $0,15$ МПа. Аналіз результатів дослідження показав, що питомі енерговитрати склали $0,69$ кДж/г, показник ДБФ дорівнював 86 см³/100 г. При цьому незначна частина, що утворила піну на поверхні суспензії, мала ДБФ 103 см³/100 г.

Загальними недоліками гідравлічних способів диспергування ТЗП в установках ЕГІ та РІА є підвищення зольності кінцевого продукту за рахунок солей металів, що знаходяться у воді, необхідність додаткових енерговитрат на видалення вологи, а також, потреба у попередньому подрібненні та підготовці вихідного матеріалу.

Лабораторний вертикальний кульовий млин, мав такі параметри: діаметр помольної камери $0,1$ м, діаметр шарів $0,005$ м та силу притискання 25 Н. Дослідження процесу подрібнення показали, що найбільша інтенсивність підвищення структурності матеріалу спостерігається в перші 30 с. У разі подальшого подрібнення інтенсивність підвищення ДБФ спадає і повністю зупиняється після 100 с. Максимальне значення показника структурності сягало 82 см³/100 г, питомі енерговитрати $0,32$ кДж/г.

Подрібнення у лабораторному відцентровому млині відбувалось за ступеня заповнення робочої камери на 30 %, лінійної швидкості периферійної ділянки робочого органу 102 м/с та вихідного матеріалу розміром $30-50$ мм. Також, під

час випробувань було визначено вплив геометричної конфігурації периферійної ділянки робочого органу (Рисунок 1) на питомі енерговитрати (Рисунок 2).



а – Z-подібна форма з більшими елементами робочого органу;

б – S-подібна форма; в – подвійна S-подібна форма

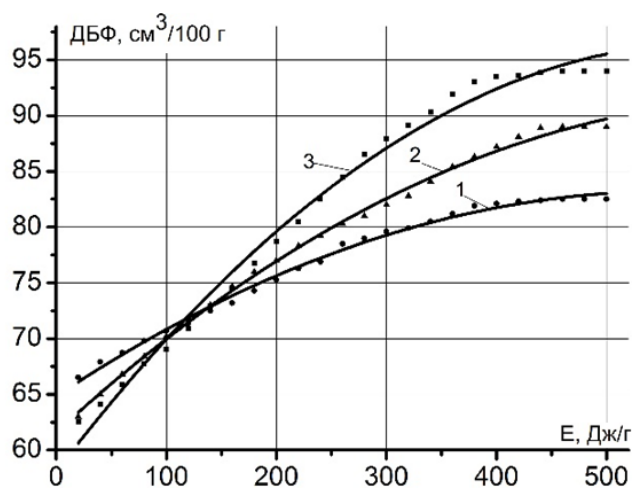
Рисунок 1 – Схема дослідних лабораторних установок

Виявлено, що зі збільшенням тривалості подрібнення швидкість збільшення коефіцієнта ДБФ знижується за експонентою. Тому існує максимальне значення показника структурності (ДБФ), яке можна досягти під час подрібнення в даному відцентровому млині. В умовах експерименту, максимальна величина коефіцієнта ДБФ, отримана після обробки впродовж 6 хв і склала $94 \text{ см}^3/100 \text{ г}$, а питомі енерговитрати на процес подрібнення – $0,25 \text{ кДж/г}$.

Порівняльний аналіз чотирьох типів розмельного обладнання показав, що подрібнення ТЗП у відцентровому млині має такі основні переваги: найменші питомі енерговитрати, відносно високий показник ДБФ та простоту конструкцію.

У третьому розділі розроблена нова конструкція відцентрового млина, обґрунтовано раціональні геометричні параметри робочого органу, його технологічні параметри (ступінь заповнення, частота обертання), виявлено залежність моменту опору на робочому органі від середнього діаметру частинок матеріалу та кутової швидкості. Також, проведено дослідження напруженого стану нової конструкції робочого органу методом скінченних елементів за допомогою програми *SolidWorks Simulations*, розглянуто динаміку пуску та перевірено можливість резонансних режимів роботи.

У результаті аналізу різних конструкцій відцентрово-ударних млинів та попередніх лабораторних випробувань була розроблена і запропонована нова конструкція відцентрового млина (Рисунок 3), що дає змогу подрібнювати неабразивні сипкі матеріали, такі як твердий залишок піролізу (ТЗП) зношених шин з найменшими питомими енерговитратами.



1,2,3 – для робочих органів (див. Рисунок 1) а, б, в відповідно
Рисунок 2 – Вплив питомих енерговитрат на показник ДБФ

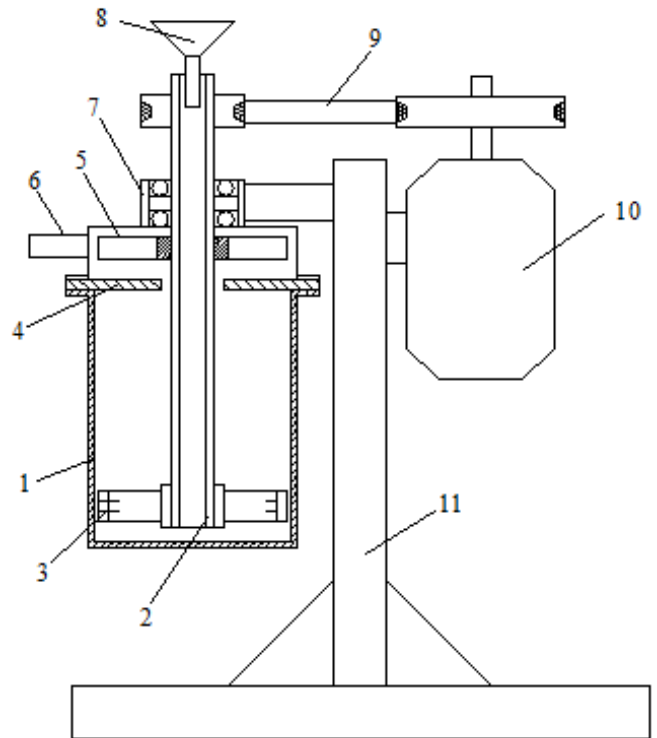
Особливістю конструкції запропонованого млина є форма робочого органу та спосіб відвантаження готового класу, що дає змогу суттєво знизити питомі енерговитрати на процес подрібнення, а також проводити класифікацію подрібнюваного матеріалу безпосередньо в млині.

Експериментальні дослідження показали, що найбільш раціональним є робочий орган з чотирма бильними елементами. Питомі енерговитрати на процес подрібнення до класу менше 43 мкм робочим органом з двома бильними елементами склали 57 кВт·год/т, а робочого органу з чотирма бильними елементами 21 кВт·год/т. Одночасно зі зниженням питомих енерговитрат збільшення бильних елементів з двох до чотирьох призводить до підвищення продуктивності процесу подрібнення (Рисунок 4).

Подальше збільшення кількості бильних елементів не збільшує продуктивності при збільшенні питомих енерговитрат. Це може бути прояснено тим, що для двох бильних елементах робочий орган не охоплює всю зону інтенсивного подрібнення, а у разі більшої кількості виходить за цю зону.

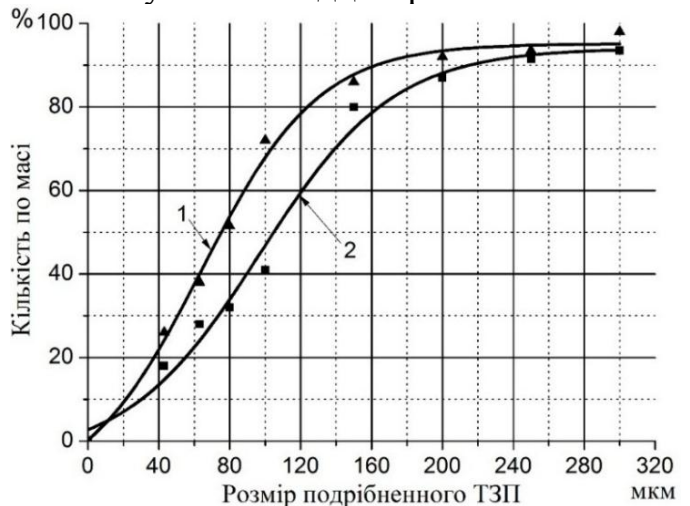
Попередні дослідження показали, що: зона інтенсивного подрібнення знаходиться в області периферійної ділянки робочого органу (поблизу стінок помольної камери), залежить від частоти обертання ротора і складає 15-25 % довжини робочого органу; раціональний зазор між бильними елементами складає 3-5 мм.

Розрахунки на міцність підтвердили доцільність замкнутої конструкції робочого органу. Зважаючи на це було розроблено нову конструкцію робочого органу, в основу якої покладено ідею зниження



1 – помольна камера; 2 – полий вал;
3 – робочий орган; 4 – кільце для класифікації; 5 – крильчатка; 6 – вихідний патрубок; 7 – підшипниковий вузол; 8 – завантажувальна воронка; 9 – ремінна передача; 10 – двигун; 11 – опорна стійка.

Рисунок 3 – Відцентровий млин



1 – чотири бильних елемента; 2 – два бильних елемента.

Рисунок 4 – Гранулометричний склад ТЗП подрібненого на протязі 1 хв робочими органами з різною кількістю бильних елементів

енерговитрат на процес надтонкого подрібнення за рахунок зміни механізму руйнування частинок.

Розроблений робочий орган наведено на рисунку 5. У даній конструкції робочого органу подрібнення матеріалу відбувається як за рахунок удару, так і за рахунок стирання.

При цьому руйнування відбувається в більшій мірі за рахунок ударної взаємодії з робочим органом у периферійній зоні, а руйнування частинок <100 мкм переважно за рахунок сил тертя при взаємодії матеріалу зі стінками помольної камери і робочим органом.

Споживана потужність робочого органу даної конструкції в режимі холостого ходу (за відсутності завантаження) може бути визначена за формулою:

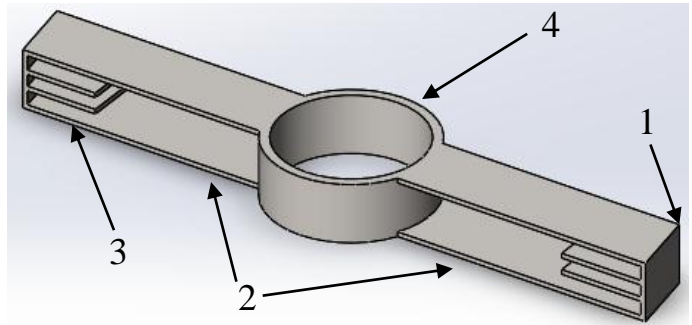
$$N = \xi \rho_c A_0 (k_v \omega_p)^3, \quad (1)$$

де ρ_c – густина середовища, з яким взаємодіє робочий орган, кг/м³; ξ – коефіцієнт лобового опору; A_0 – параметр, що враховує геометрію робочого органу, м⁵; $k_v \omega_p$ – кутова швидкість робочого органу відносно середовища, с⁻¹; ω_p – кутова швидкість робочого органу, с⁻¹; k_v – коефіцієнт, що характеризує з якою швидкістю робочий орган взаємодіє з середовищем ($k_v = 1 - \omega_c / \omega_p$); ω_c – кутова швидкість обертання середовища (с⁻¹).

На рисунках 6 і 7 наведено залежності кутової швидкості повітря та споживаної потужності робочим органом від частоти обертання. Крім того, на рисунку 8 показана експериментальна залежність споживаної потужності робочим органом за завантаженої помольної камери твердим залишком піролізу шин із середнім розміром частинок $d_{cp} = 40$ мкм.

Аналіз експериментальних даних показав, що швидкість повітря прямопропорційно залежить від частоти обертання робочого органу, при цьому коефіцієнти пропорційності дорівнюють $k_1 = 0,92$, $k_2 = 0,83$, коефіцієнт лобового опору $\xi = 12,6$.

У результаті встановлено: при роботі на повітрі, потужність, що споживається залежить від частоти в третьому ступені, що підтверджує правильність рівняння (1); при подрібнюванні ТЗП потужність, що споживається залежить в першому



1 – елемент кріплення робочого органу;
2 – бильні елементи; 3 – бильні елементи в зоні інтенсивного подрібнення;
4 – торцевий бильний елемент
Рисунок 5 – Робочий орган нової конструкції

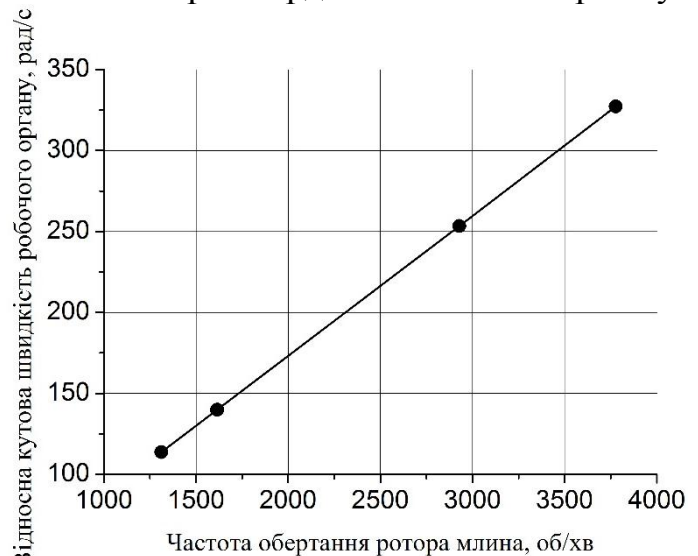


Рисунок 6 – Кутова швидкість повітряного потоку

ступені від частоти обертання (Рисунок 8). Це можна пояснити тим, що в процесі подрібнення матеріал, під дією відцентрових сил, нерівномірно розподіляється в об'ємі помольної камери, і концентрується біля її стінок. У результаті зменшується активна ділянка робочого органу, що вносить додаткові зміни в розподіл сил опору.

На підставі зіставлення рівняння (1) і експериментальних даних (Рисунок 8) можна дійти висновку, що залежність параметра, який характеризує розміри активної ділянки робочого органу від частоти обертання має вигляд (Рисунок 9) та може бути представлена залежністю:

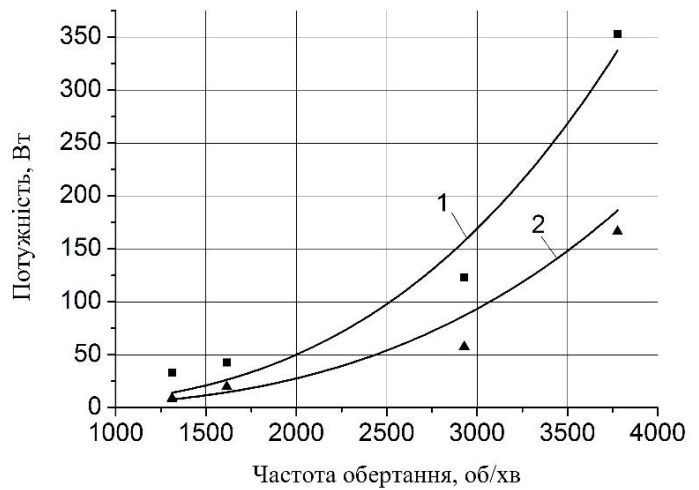
$$A_0(\omega) = A\nu\omega_p^{-2}, \quad (2)$$

де $\nu = 1,72$ коефіцієнт, що враховує зменшення активної ділянки робочого органу.

Враховуючи (2), а також залежність потужності, що споживається робочим органом, отримана формула для визначення споживаної потужності на подрібнення ТЗП:

$$N = 2,31A\rho_c\omega_p\xi\left(\frac{d_{cp}}{d_{40}}\right)^{0,3}. \quad (3)$$

З метою визначення надійності роботи робочого органу розв'язувалась задача статичної пружності. Система стаціонарних диференціальних рівнянь статичної пружності для ізотропного матеріалу, яка включає рівняння руху і рівноваги, геометричне рівняння – тензор нескінченно малих деформацій (Ейлера або Лагранжа), та фізичне рівняння – узагальнений закон Гука, у символічній формі має вигляд:



1 – при знятій помольній камері;
2 – в помольній камері

Рисунок 7 – Криві зміни споживаної потужності робочим органом

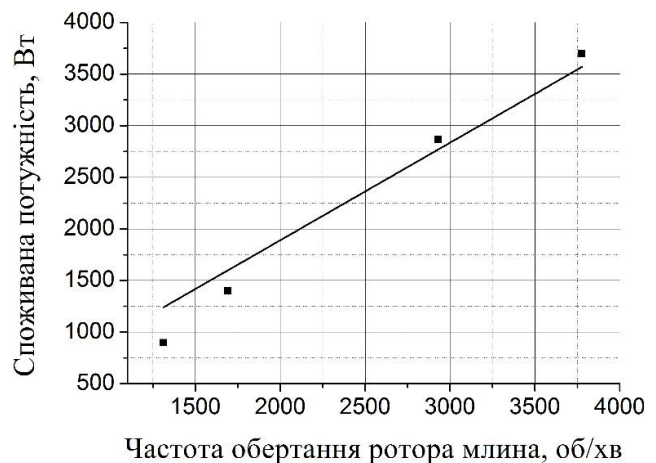


Рисунок 8 – Залежність енергоспоживання від частоти обертання робочого органу під час подрібнення

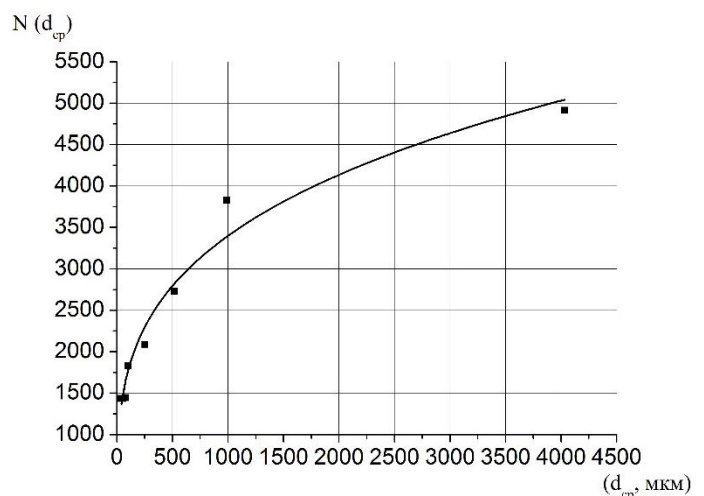


Рисунок 9 – Залежності зміни енергоспоживання від середнього діаметра частинок за кутової швидкості 389 с^{-1}

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \hat{\sigma} + \mathbf{f} = 0; \\ \hat{\varepsilon} = \frac{1}{2}(\mathbf{u}\nabla + \nabla\mathbf{u}); \\ \hat{\sigma} = \frac{E}{1+\nu} \left(\hat{\varepsilon} + \frac{\nu}{1-2\nu} \hat{\mathbf{I}} \text{tr}(\hat{\varepsilon}) \right), \end{array} \right. \quad (4)$$

де ∇ – оператор Гамільтона, м^{-1} ; x_i , $i=1,2,3$ – декартові координати, м; $\hat{\sigma}$ – симетричний тензор напруження другого рангу, Па; (\cdot) – оператор скалярного добутку тензорів; \mathbf{f} – вектор об'ємних сил, наприклад, гравітаційних, інерційних Н/м^3 ; $\hat{\varepsilon}$ – симетричний тензор другого рангу пружних деформацій; \mathbf{u} – вектор переміщення, м; E – модуль пружності, Па; ν – коефіцієнт Пуасона; $\hat{\mathbf{I}}$ – одиничний тензор другого рангу; $\text{tr}(\cdot)$ – оператор сліду тензора.

Граничні умови для (4):

- переміщення або защемлення (хоча б в одній точці на поверхні тіла) $\mathbf{u}|_{S_u} = 0$, де S_u – поверхня (або точка поверхні), на якій задано переміщення;
- симетрії $\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}|_{S_{su}} = 0$, де \mathbf{n} – вектор зовнішньої нормалі до поверхні тіла; S_{su} – поверхня симетрії тіла;
- зовнішні зусилля або вектор напруження $\hat{\sigma} \cdot \mathbf{n}|_{S_p} = \mathbf{p}$, де $\mathbf{p} = p^i$ – вектор напруження, що діє на поверхні S_p , Па;
- зовнішня сила, прикладена у точці тіла $\mathbf{F}_p = \int_{\Delta S_p} \hat{\sigma} \cdot \mathbf{n} dS$, де

\mathbf{F}_p – вектор зовнішньої сили у точці P , Н; ΔS_p – елементарна площадка поверхні тіла в околі точки P , м^2 .

Співвідношення для визначення запасу міцності. Еквівалентні напруження σ_{eqvM} за Мізесом визначаються за формулою:

$$\sigma_{\text{eqvM}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{13}^2)}, \quad (5)$$

де σ_{ij} , $i, j = 1, 2, 3$ – компоненти тензора напруження, Па.

Запас міцності F_s пластичних матеріалів визначається за формулою

$$F_s = \frac{[\sigma_T]}{\sigma_{\text{eqvM}}}, \quad (6)$$

де $[\sigma_T]$ – границя текучості матеріалу, Па; σ_{eqvM} – еквівалентне напруження за Мізесом, Па.

Результати числового аналізу напружено-деформованого стану робочого органу млина виконано методом скінченних елементів з використанням програмного продукту *SolidWorks Simulations* (Рисунок 10).

На рисунку 10 наведено тривимірні поля розподілу нормальних напружень при врахуванні як сил інерції, так і сил лобового опору, що діють на торцеву частину бильних елементів.

Розрахунок проводився для статичної схеми навантаження. Розрахункова сітка з тетраедричних елементів включала: 72316 вузлів і 44102 скінченних елементів. Використовувалась четверта (енергетична) теорія міцності (5). В результаті розрахунків на міцність встановлено, що робочий орган має запас міцності більше 2,5, що підтверджує працездатність конструкції (патент № 106127).

Для виявлення резонансних режимів роботи та особливостей процесу пуску млина використовувалася система звичайних диференціальних рівнянь (7), що описує динамічні процеси в приводі млина.

Знаючи закон зміни моменту опору в часі, визначено потужність двигуна з умови нагрівання його обмоток до температури, що допускається. З цією метою було розроблено математичну модель динаміки приводу, яка крім часу пуску млина дає змогу визначити динамічні навантаження в механічній системі й вибрати його раціональні параметри. Система звичайних диференціальних рівнянь, що описує динамічні процеси у відцентровому млині під час пуску має вигляд:

$$\begin{cases} I_1 \ddot{\varphi}_1 + \mu_1 (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) + c_1 (\varphi_1 - \varphi_2) = M_{\text{дв}} (\dot{\varphi}_1); \\ I_2 \ddot{\varphi}_2 - c_1 (\varphi_1 - \varphi_2) - \mu_1 (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) + c_2 (\varphi_2 - \varphi_3) + \mu_2 (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) = 0; \\ I_3 \ddot{\varphi}_3 - c_2 (\varphi_2 - \varphi_3) - \mu_2 (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) = -M_o (\dot{\varphi}_3, t), \end{cases} \quad (7)$$

де I_1, I_2, I_3 – моменти інерції двигуна, вузла трансмісії та робочого органу, відповідно, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – кут повороту ротора двигуна, шківу трансмісії, робочого органу млину відповідно, рад; c_1, c_2 , – жорсткість ланцюгів трансмісії, $\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$ (Н·м); $M_{\text{дв}} (\dot{\varphi}_1), M_o (\dot{\varphi}_3, t)$ – обертовий момент двигуна та момент опору робочого органу, $\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$ (Н·м); μ_1, μ_2 – коефіцієнт сил в'язкого опору, $\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, (Н·м·с).

Момент опору на робочому органі в період пуску змінюється згідно залежності:

$$M_{\text{оп}} (\varphi_3) = M_{\text{ст}} + \frac{M_{\text{ном}} - M_{\text{ст}}}{\omega_{\text{н}}^2} \dot{\varphi}_3^2, \quad (8)$$

де $M_{\text{оп}} (\varphi_3)$ – момент опору на робочому органі, Н·м; $M_{\text{ст}}$ – початковий (статичний) момент опору, Н·м; $M_{\text{ном}}$ – номінальний момент опору, Н·м; $\omega_{\text{н}}$ – номінальна кутова швидкість, с^{-1} ; $\dot{\varphi}_3$ – кутова швидкість робочого органу, с^{-1} .

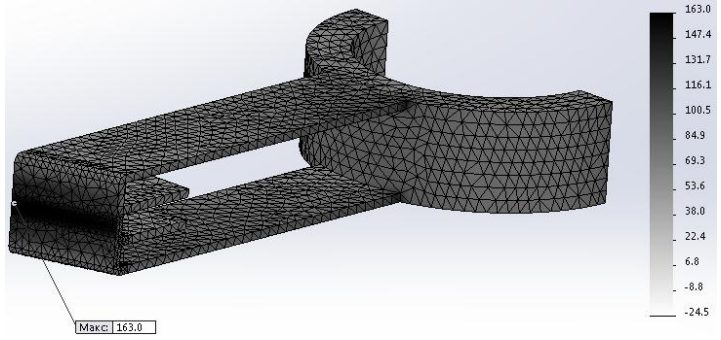


Рисунок 10 – Епюра нормальних напружень у робочому органі з 4 бильними елементами при врахуванні як сил інерції так і нормального моменту опору, що діє у процесі подрібнення (кутова швидкість 512 с^{-1})

Момент двигуна визначається за формулою:

$$M_{\text{дв}} = \frac{2M_{\text{max}} \left(1 + \frac{x_1}{r_0} \right)}{\frac{s_m}{s} + \frac{s}{s_m} + 2 \frac{x_1}{r_0}}, \quad (9)$$

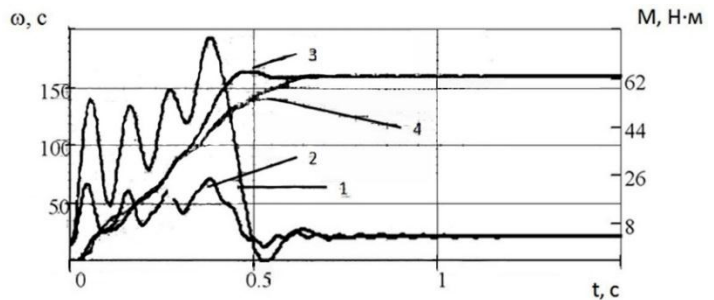
де $M_{\text{дв}}$ – момент на валу двигуна, Н·м; s – коефіцієнт дійсного ковзання; s_m – коефіцієнт критичного ковзання; x_1 – активний опір фази статора, Ом; r_0 – повний реактивний опір електродвигуна, Ом.

Моделювання динаміки пуску відцентрового млина проводилися у пакеті Mathcad методом Рунге-Куты з адаптивним кроком розрахунку. Результати моделювання представлені на рисунку 11.

У четвертому розділі з метою встановлення закономірностей кінематики потоку гетерогенного середовища в помольній камері млина, взаємодії його з робочим органом та класифікації подрібненого матеріалу під час видалення з помольної камери проведено дослідження газодинаміки процесів у проточній частині відцентрового млина.

Геометрія проточної області показана на рисунку 12: вхідний переріз 1, полий вал 2, робочий орган 3, помольна камера 4, вихідний переріз 5 та равликова камера 6.

Газодинамічні процеси у стисливому середовищі проточної частини відцентрового млина описуються системою нестационарних рівнянь нерозривності, Нав'є-Стокса, енергії і рівняння стану в наближенні $k-\omega$ моделі турбулентності:



1, 2 – крутний момент в ланках передач з жорсткістю c_1 і c_2 відповідно;

3, 4 – розрахункові та експериментальні залежності кутової швидкості робочого органу млина, відповідно

Рисунок 11 – Динаміка пуску відцентрового млина

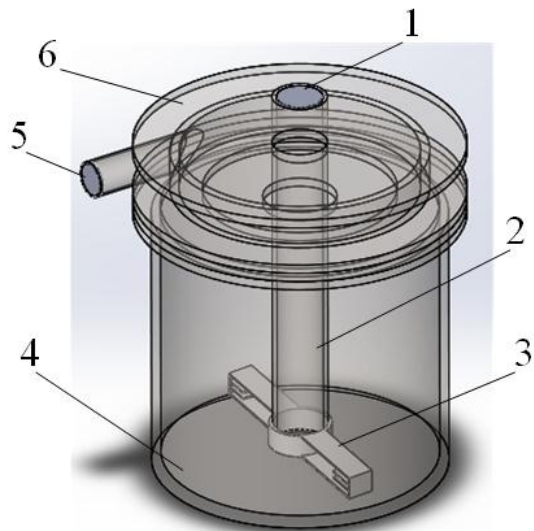


Рисунок 12 – Геометрична модель помольної камери відцентрового млина

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{v}}) = 0; \\ \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{v}})}{\partial t} + (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{v}} \cdot \nabla) \tilde{\mathbf{v}} = -\nabla \bar{p} + \nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\tau}}_{\text{eff}}; \\ \frac{\partial (\bar{\rho} k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} k \tilde{\mathbf{v}}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + \tilde{G}_k - Y_k + S_k; \\ \frac{\partial (\bar{\rho} \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \omega \tilde{\mathbf{v}}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_w} \right) \nabla \omega \right] + \tilde{G}_w - Y_w + D_w + S_w; \\ \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{E})}{\partial t} + \nabla \cdot \tilde{\mathbf{v}} (\bar{\rho} \tilde{E} + \bar{p}) = \nabla \cdot \left[\left(\lambda + \frac{c_p \mu_t}{\text{Pr}_t} \right) \nabla \tilde{T} \right] + \nabla \tilde{\mathbf{v}} : \bar{\boldsymbol{\tau}}_{\text{eff}} + q_v, \end{array} \right. \quad (10)$$

де ρ – густина, осереднена за Reynolds, кг/м³; t – час, с; ∇ – оператор Гамільтона, м⁻¹; $\tilde{\mathbf{v}}$ – вектор швидкості, осереднений за Favre, м/с; p – тиск, осереднений за Reynolds, Па; k – турбулентна кінетична енергія, Дж/кг; ω – відносна швидкість дисипації кінетичної енергії турбулентності, с⁻¹; μ – динамічна в'язкість, Па·с; μ_t – турбулентна в'язкість, Па·с; σ_k – коефіцієнт ослаблення μ_t для малих чисел Reynolds; \tilde{G}_k – джерельний член для k , Вт/м³; \tilde{G}_w – джерельний член для ω , кг/(м³·с²); S – тензор швидкості деформації, с⁻¹; D_w – член, що враховує перехресну дифузію, кг/(м³·с²); \tilde{E} – масова повна енергія, Дж/кг; $\bar{\boldsymbol{\tau}}_{\text{eff}}$ – тензор девіаторних напружень, Па; q_v – густина об'ємного джерела теплоти, Вт/м³; \tilde{T} – абсолютна температура, осереднена за Favre, К.

Початкові та граничні умови для (10) мають вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{\mathbf{v}}(X) = 0; \\ \bar{p}(X) = p_0; \\ k(X) = k_0; \\ \omega(X) = \omega_0; \\ \tilde{T}(X) = \tilde{T}_0, \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{n} \cdot \tilde{\mathbf{v}} = 0; \\ \bar{p} = p_{\text{ex}}; \\ k = k_{\text{ex}}; \\ \omega = \omega_{\text{ex}}; \\ \tilde{T} = \tilde{T}_{\text{ex}}, \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{n} \cdot \tilde{\mathbf{v}} = \tilde{v}_{\text{ex}}; \\ \bar{p} = p_{\text{ex}}; \\ k = k_{\text{ex}}; \\ \omega = \omega_{\text{ex}}; \\ \tilde{T} = \tilde{T}_{\text{ex}}, \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \tilde{\mathbf{v}} = 0; \\ \mathbf{n} \cdot \nabla \bar{p} = 0; \\ k = 0; \\ \omega = \omega_{\text{cmi}}; \\ \mathbf{n} \cdot \nabla \tilde{T} = 0, \end{array} \right. \quad (11)$$

де $X(x, y, z) \in \Omega$ – декартові координати, м; Ω – розрахункова область.

Числовий аналіз виконано на базі методу скінченних об'ємів в програмному середовищі *SolidWorks*. При цьому початкові термодинамічні параметри тиск та температура в усіх точках проточної частини становили 101325 Па та 293,2 К відповідно, проекції швидкості потоків на осі координат у кожній точці дорівнювали нулю, інтенсивність турбулентності 2 %, масштаб турбулентності 0,0036 м. Кутова швидкість обертання валу та робочого органу змінювалась в процесі дослідження від 45 рад/с до 500 рад/с.

Граничні умови в перерізах вхідного та вихідного патрубків змінювались в процесі дослідження. Розрахункова сітка складалась з 120433 комірок у

проточній частині. Збіжність результатів оцінювалась за проекціями швидкості та тиску на осі координат. Збіжність вважалась достатньою, якщо усереднене значення мети на інтервалі аналізу становить менше критерія збіжності.

Для перевірки адекватності моделі та достовірності результатів моделювання виконано порівняння з експериментальними даними. Розбіжність між експериментальними та розрахунковими даними не перевищує 7 %, що підтверджує адекватність розробленої числової моделі.

Аналіз результатів математичного моделювання процесів у робочій камері показав, що потік повітря здійснює складний обертальний рух у повздовжньому та поперечному перерізах (Рисунок 13, а, б) з утворенням локальних зон підвищеної турбулентності 1 (Рисунок 13, б).

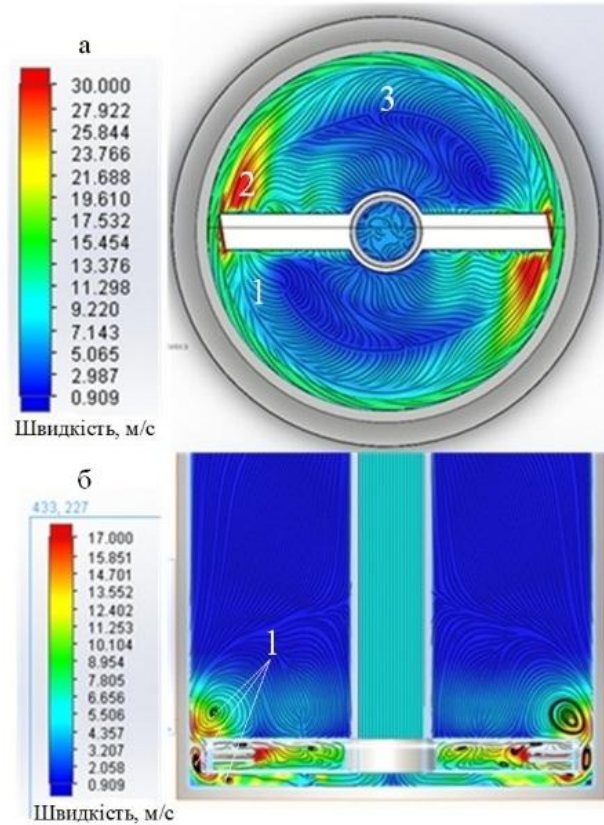
У результаті числового моделювання та аналізу результатів було виявлено, що в області робочого органу в поперечному перерізі повітряні потоки можна розділити на три групи, а саме: потоки перед робочим органом, область 1 (Рисунок 13, а), що охоплюють зону на відстані

15-20 мм перед робочим органом; потоки за робочим органом, область 2 (Рисунок 13, а), що охоплюють зону на відстані 60-70 мм за робочим органом; відносно незбурені потоки, область 3 (Рисунок 13, а). Середня швидкість потоку матеріалу в зоні бильних елементів становить 12,6 м/с, а лінійна швидкість робочого органу 68,72 м/с. Таким чином, відносна швидкість зіткнення потоку матеріалу з бильними елементами становить 56 м/с, тобто 81,5 % від швидкості обертання робочого органу.

Траєкторії руху твердих частинок визначаються інтегруванням за псевдо-часовими кроками рівняння балансу сил, що діють на частинку, записаного у Лагранжевій системі відліку:

$$\frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \mathbf{F}_D(\mathbf{u} - \mathbf{u}_p) + \frac{\mathbf{g}(\rho - \rho_p)}{\rho_p}, \quad (12)$$

де \mathbf{u} – вектор швидкості газового середовища, м/с; \mathbf{u}_p – вектор швидкості твердих частинок м/с; $\mathbf{F}_D = 18\mu C_D \text{Re} / (\rho_p d_p^2 24)$ – сила гідравлічного опору, віднесена до одиниці маси частинки, 1/с; C_D – безрозмірний коефіцієнт



а – повздовжній переріз,

б – поперечний переріз

Рисунок 13 – Поля швидкостей та траєкторій потоку повітря і твердих частинок за кутової швидкості робочого органу 498 с⁻¹

гідравлічного опору; ρ_p – густина твердих частинок, кг/м^3 , d_p – усереднений діаметр твердих частинок, м; $\text{Re} = \rho_p d_p |\mathbf{u}_p - \mathbf{u}| / \mu$ – число Рейнольдса.

Важливим, з точки зору підвищення ефективності подрібнення, є те що повітря з частинками матеріалу, проходячи через зазори між бильними елементами, збільшують свою швидкість до 31 м/с, а в зоні бильних елементів робочого органу утворюються турбулентні каверни, де матеріал концентрується.

Важливим фактором подрібнення є швидкість зіткнення матеріалу з робочим органом, тому, досліджено її залежність від кутової швидкості робочого органу. Встановлено, що швидкість зіткнення потоку повітря і твердих частинок з бильними елементами робочого органу може бути апроксимовано лінійною функцією з коефіцієнтом детермінації 0,99 (Рисунок 14).

Продуктивність млина обумовлена двома чинниками: швидкістю утворення готового класу (швидкість подрібнення) та видалення з помольної камери готового класу. Тому, важливим науковим та практичним результатом є визначення залежності максимального розміру частинок, що видаляються з помольної камери від швидкості потоку та розрідження створеного на виході.

Експериментально визначалися залежності максимального діаметру частинок d_{max} , що видаляється з помольної камери від величини витрати повітря на виході. Для узагальнення отриманих результатів на рисунку 15 наведена залежність d_{max} від відносної витрати повітря, що дорівнює відношенню витрати повітря до об'єму помольної камери $q = Q/V$ (Q – витрата повітря, $\text{м}^3/\text{с}$; V – об'єм камери, м^3). Використовуючи розроблену методику досліджено вплив тиску на виході відцентрового млина на розміри видаленого матеріалу (Рисунок 16).

У п'ятому розділі виконано дослідження кінетики процесу подрібнення твердого залишку піролізу у відцентровому млині, а також обґрунтовано основні напрямки використання продуктів подрібнення.

Загальна формула кінетики подрібнення має вигляд:

$$R_x(t) = R_{100-x} k_0^{t^m}, \quad (13)$$

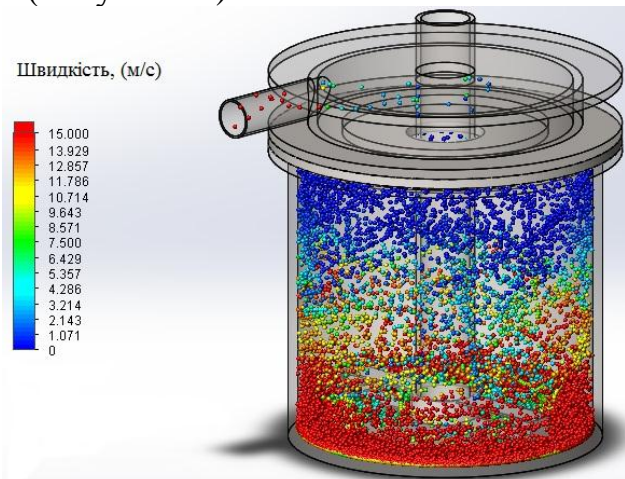
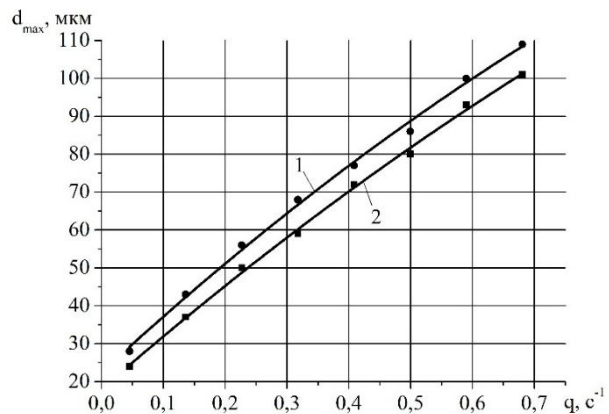


Рисунок 14 – Результати моделювання процесу класифікації та видалення готового класу за швидкості потоку на виході 9 м/с



1, 2 – експериментальна та розрахункова залежності, відповідно

Рисунок 15 – Залежність максимального діаметру частинок, що видаляються з помольної камери від відносної витрати повітря на виході

де R_x – кількість класу крупнішого за заданий, %; R_{100-x} – кількість класу крупнішого за заданий у вихідному матеріалі, %; k_0 – константа, що характеризує відносну швидкість подрібнення; m – параметр, що характеризує зміну відносної швидкості подрібнення; t – час подрібнення, хв.

Вихідним матеріалом для подрібнення був твердий залишок піролізу зношених автомобільних шин попередньо відділений від металевого кордуну з розміром частин 10-50 мм.

Гранулометричний склад подрібненого продукту піролізу зношених шин визначений лазерно-дифракційним аналізом представлений на Рисунок 17. У результаті встановлено, що за цільового класу 10 мкм, значення констант у рівнянні будуть такими: $R_{100-x} = 100$ (%); $k_0 = 0,897$; $m = 0,59$. Для інших цільових класів значення констант наведено у таблиці 1.

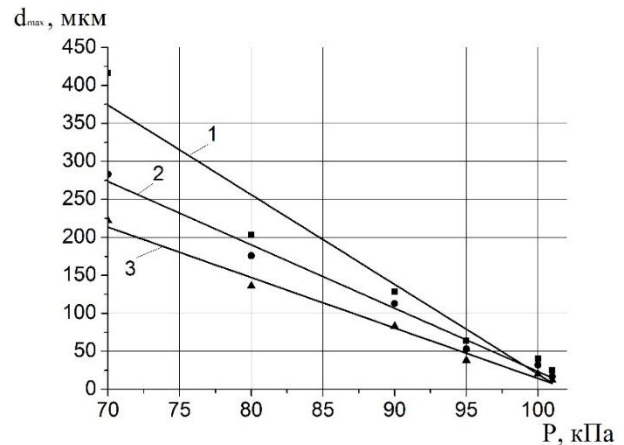
Аналіз зображення зразків подрібненого ТЗП (Рисунок 18), що отримано за допомогою растрового електронного мікроскопу REM-106I, показав, що кінцевий продукт подрібнення має розміри частинок менше 30 мкм.

Для отримання залежності розподілу частинок матеріалу по класам була проведена обробка зображення з електронного мікроскопу за допомогою нанесення на нього еталонної сітки, аналогічно сити, та визначено розміри частинок ТЗП.

Таблиця 1 – Значення кінетичних параметрів для різних класів продуктів подрібнення ТЗП у відцентровому млині

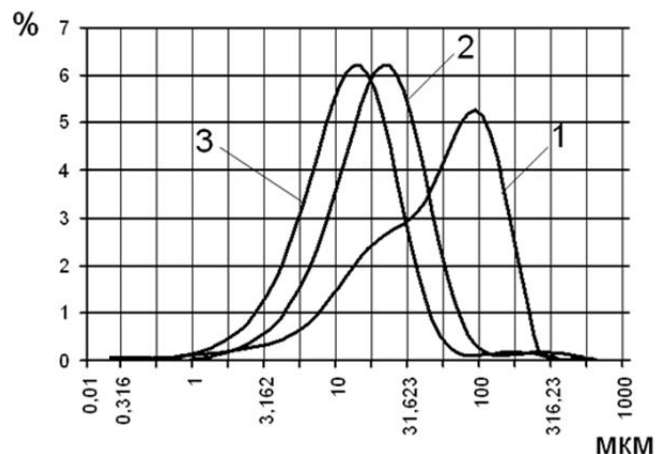
Клас, мкм	R_{100-x} , %	k_0	m
≤ 10 мкм	100	0,897	0,59
≤ 40 мкм	100	0,69	0,39
≤ 70 мкм	100	0,58	0,33
≤ 100 мкм	100	0,43	0,27

На рисунку 19 наведено дані аналізу дисперсного складу ТЗП уловленому рукавним фільтром. У результаті аналізу зображень з мікроскопу отримали, що



1 – 365 рад/с; 2 – 255 рад/с; 3 – 121 рад/с

Рисунок 16 – Залежність максимального діаметру частинок, що видаляються з помольної камери від тиску на виході



1, 2, 3 – дві, чотири та шість хвилини подрібнення, відповідно

Рисунок 17 – Зміна гранулометричного складу ТЗП у відцентровому млині під час подрібнення

середній діаметр подрібненого матеріалу в циклоні складає 15,6 мкм, а в рукавному фільтрі 9,8 мкм.

Споживання енергії під час подрібнення в млині з діаметром помольної камери 0,3 м та її завантаженні на рівні 25 % об'єму складає 11,5 кВт·год/т. Млин з вищенаведеними параметрами дає змогу отримувати 320 кг на добу ТЗП з середнім діаметром часток 9,8 мкм.

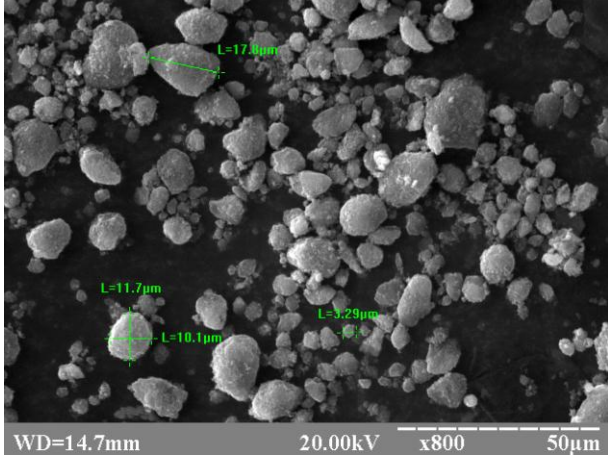
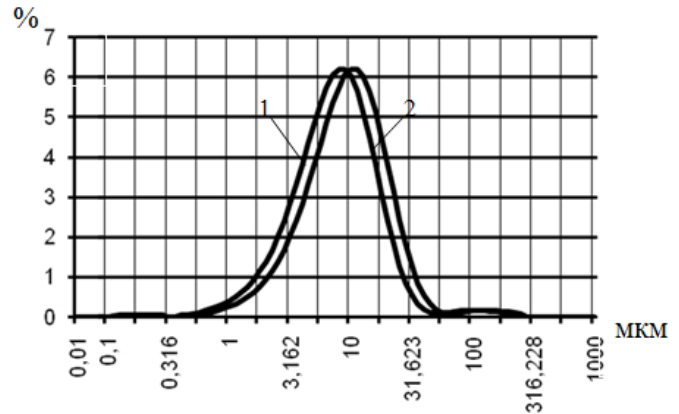


Рисунок 18 – Зображення ТЗП з рукавного фільтру отримане за допомогою мікроскопу РЕМ–106І



1 – циклон, 2 – рукавний фільтр

Рисунок 19 – Грансклад подрібненого ТЗП, визначений методом електронної мікроскопії

З метою встановлення ефективності використання подрібненого ТЗП як аналогу технічного вуглецю, проведено серію експериментів з виготовлення та випробування гумових зразків для яких за наповнювач використано ТЗП різної крупності. За наповнювач взято ТЗП після подрібнення у лабораторному відцентровому млині з помольної камери, циклону та рукавного фільтру.

Як еталонний зразок виготовлено гуму з наповнювачем технічним вуглецем (ТВ) П-803. Результати випробувань зазначених зразків за основними показниками представлені у таблиці 2.

Таблиця 2 – Основні фізико-механічні показники гумових зразків з використанням наповнювачів ТЗП та ТВ П-803

Параметр гумових зразків	Наповнювач			
	ТЗП $d_{cp}=46$ мкм	ТЗП $d_{cp}=16$ мкм	ТЗП $d_{cp}=9$ мкм	ТВ П-803
Умовний опір розриву, МПа	7,48	7,6	7,72	8
Опір роздиранню, кгс/см ²	14,2	14,6	14,8	14,5
Еластичність	0,13	0,13	0,14	0,12
Умовне напруження, МПа	4,3	4,6	5,2	5,6
Відносне подовження, %	390	375	370	380

Цикл подрібнення ТЗП, призводить до підвищення зольності матеріалу, що залишається у циклоні, оскільки частинки золи за однакової з вуглецем дисперсності є важчими. Використання в гумі наповнювача із зольністю, що перевищує 10 % недопустимо. Тому, цікавим з точки зору можливого використання подрібненого ТЗП з підвищеним вмістом золи є його добавка до керамічних мас. Зважаючи на це було проведено серію випробувань керамічних

зразків із вмістом подрібненого ТЗП (від 0 до 10 %) з середнім діаметром частинок $d_{cp} = 46$ мкм.

Графік результатів випробувань наведено на рисунку 20. У випадку коли до керамічної маси додається 2 % подрібненої вигоряючої домішки твердого залишку піролізу, міцність керамічного зразка суттєво підвищується, але не спостерігається явно вираженого піку. У разі подальшого збільшення концентрації (6, 8, 10 мас. %) вигоряючої домішки спостерігається поступове зниження міцності, що пов'язано із значним розпушенням структури керамічної маси.

Випробування показали, що в результаті випалювання ТЗП вигорає повністю і не впливає на кольоровий відтінок отриманого керамічного виробу. У разі введення 4 мас.% домішки, характеристика зміни міцності керамічного зразку практично ідентична показникам зразку без домішок ТЗП.

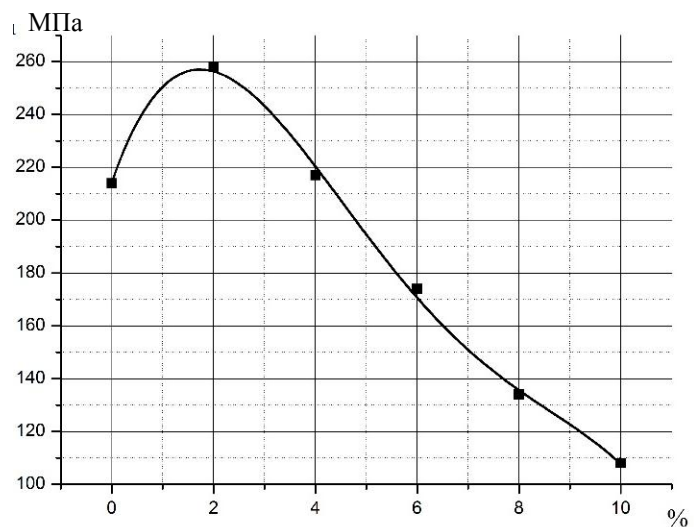


Рисунок 20 – Залежність міцності керамічних зразків від вмісту наповнювача ТЗП за температури випалу 1050 °C

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена комплексна задача по науково обґрунтованому вибору параметрів відцентрового млина, розроблена методика розрахунку його основних конструктивних та технологічних параметрів, визначено кінетичні залежності процесу подрібнення ТЗП та встановлено напрямки ефективного використання подрібненого продукту як технічного вуглецю.

Новизна та практична цінність роботи підтверджена патентами на винахід та актом впровадження результатів. Виконана комплексна наукова робота за результатами якої отримано наступні висновки.

1. Проведено аналіз літературних даних, показана перспективність використання твердого залишку піролізу як технічний вуглець, обрано перспективне розмільне обладнання.

2. Проведено дослідження лабораторних зразків розмільного обладнання, визначено питомі енерговитрати на процес подрібнення ТЗП та можливі значення коефіцієнту ДБФ, що досягаються різними способами подрібнення. Обґрунтовано доцільність використання відцентрового млина для подрібнення ТЗП.

3. Запропоновано конструкційні параметри робочого органу і млина в цілому, що забезпечують мінімальні питомі енерговитрати на подрібнення матеріалу. Отримано формулу для визначення споживаної потужності робочим органом відцентрового млина під час подрібнювання твердих залишків піролізу зношених автомобільних шин. Встановлено, що споживана потужність у

процесі подрібнення лінійно залежить від частоти його обертання, та пропорційна середній крупності твердих частинок, в ступені 0,3.

4. У разі підвищення дисперсності частинок ТЗП від середнього діаметра 63 мкм до 9 мкм спостерігається, що еластичність та опір розриву модельних гум практично не залежить від дисперсності наповнювача; умовне напруження та опір роздиранню має нелінійну зворотну залежність; відносне подовження пряму нелінійну залежність.

5. Випробувано суміші для нашпальних прокладок рейкових шляхів, в умовах ВАТ БЗГТВ, що виготовлено на основі подрібненого ТЗП зношених шин і технічного вуглецю П-803 показали, що для співвідношення ТЗП: П-803 – 1:1 на відміну від використання як наповнювача лише ТЗП умовна міцність підвищується на 12%, в той же час спостерігається зниження питомого об'ємного опору в 3,3 разів, та відносного подовження під час розриву на 27,8 %.

6. Показано, що твердий залишок піролізу може бути використаний як опіснювач для виготовлення керамічних виробів. Це дає змогу знизити загальну усадку з 6,6% при керамічній масі без домішки, до 3,6% при 10 мас.% доданого твердого залишку піролізу. Оптимальним є використання керамічної суміші з вмістом 2 мас.% подрібненого ТЗП, що дає змогу для температури випалу 1100 °С знизити усадку з 6,6 % до 4,2 % з одночасним підвищенням міцності на 6,57 МПа та водопоглинання з 0,5% до 1,1 %. Показано, що випалені керамічні зразки зберігають свій природній колір і відтінок, що є важливою властивістю для виготовлення керамічної цегли.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях:

1. Виноградов Б. В. Об измельчении твердых остатков пиролиза изношенных автомобильных шин электрогидроимпульсным способом / Б. В. Виноградов, Д. А. Федин, В. И. Емельяненко, **И. А. Осташко** // Вопросы химии и химической технологии. – 2008, № 6. – С. 163–166. *Особистий внесок здобувача: проведення експерименту, аналіз та узагальнення результатів.*
2. Виноградов Б. В. Измельчение твердых остатков процесса пиролиза изношенных автомобильных шин в центробежной мельнице / Б. В. Виноградов, **И. А. Осташко**, В. И. Емельяненко // Вопросы химии и химической технологии №2 2009 С. 159-161. *Особистий внесок здобувача: експериментальні дослідження роботи відцентрового млина, аналіз отриманих результатів.*
3. Виноградов Б. В. Об энергетических характеристиках центробежных мельниц с S-образным рабочим органом / Б. В. Виноградов, **И. А. Осташко** // Вістник НТУ «ХПІ». – 2009. – № 25. – С. 64-69. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень впливу форми периферійної ділянки робочого органу на інтенсивність подрібнення та питомі енерговитрати.*
4. Виноградов Б. В. Повышение эффективности применения твердого остатка пиролиза изношенных шин в качестве наполнителя эластомерных материалов. / Б. В. Виноградов, Ю. Н. Ващенко, **И. А. Осташко**, В. И. Емельяненко // Вопросы химии и химической технологии. – 2010. – №1. –

- С. 199-202. *Особистий внесок здобувача: експериментальні дослідження з визначення характеристик отриманих гум з ТЗП, отримання залежності.*
5. Осташко І. О. Аналіз міцності S-подібного робочого органу відцентрового млина / **І. О. Осташко** // Вопросы химии и химической технологии. – 2010. – №2. – С. 150-152. *Особистий внесок здобувача: розробка числової моделі та розрахунок на статичну пружність конструкції робочого органу відцентрового млина.*
6. Виноградов Б. В. Застосування роторно-імпульсного апарату для диспергування твердого залишку піролізу зношених автомобільних шин / Б. В. Виноградов, **І. А. Осташко** // Вістник НТУ «ХП». – 2010. – № 66. – С. 74-79. *Особистий внесок здобувача: дослідження процесу подрібнення ТЗП у роторно-імпульсному апараті, отримання констант кінетики.*
7. **Осташко І. О.** Динаміка механічної системи відцентрового млина / І. О. Осташко, Б. В. Виноградов // Вопросы химии и химической технологии. – 2011. – №6. – С. 218-220. *Особистий внесок здобувача: моделювання динаміки пуску відцентрового млина та експериментальна перевірка результатів.*
8. **Осташко І. О.** Обґрунтування параметрів робочого органу відцентрового млина / **І. О. Осташко**, Б. В. Виноградов // Вопросы химии и химической технологии. – 2012. – №5 – С. 182–184. *Особистий внесок здобувача: експериментальні дослідження з визначення впливу геометричних параметрів робочого органу на питомі енерговирати та продуктивність подрібнення.*
9. **Осташко І. О.** Твердий залишок піролізу як енергозберігаюча добавка в технології будівельної кераміки / **І. О. Осташко**, Б. В. Виноградов, В. В. Коледа // Вістник НТУ «ХП». – 2012. – № 59. – С. 80-85. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень ефективності використання подрібненого ТЗП у керамічній масі.*

Статті у закордонних фахових виданнях:

10. **Осташко І. А.** Твердый остаток пиролиза как наполнитель резиновых прокладок рельсовых путей / **І. А. Осташко**, Б. В. Виноградов, Ю. Н. Ващенко // Промышленное производство и использование эластомеров – 2013. – №1. – С. 29-32. *Особистий внесок здобувача: експериментальні дослідження впливу параметрів відцентрового млина на процес подрібнення ТЗП.*
11. Vinogradov B. Substantiation of key parameters of a centrifugal mill intended for grinding solid residue from the pyrolysis of used automobile tyres / B. V. Vinogradov, **I. O. Ostashko** // Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. – 2016, 91, P. 133-141. ISSN: 0209-3324. DOI: 10.20858. *Особистий внесок здобувача: експериментальні дослідження інтенсивності процесу подрібнення твердого залишку піролізу.*
12. **Ostashko I. O.** Aeromechanics of processes in the flow part of a centrifugal mill / **I. O. Ostashko**, B. V. Vinogradov // Acta Mechanica Slovaca. – 2017, Vol. 21, №3, P. 51-57. ISSN: 1335-2393. *Особистий внесок здобувача: проведення числового моделювання процесів у проточній частині відцентрового млина.*

Патенти України на винахід:

13. Пат. 90631 С Україна, МПК В02С 13/14. Відцентровий млин ударної дії / Виноградов Б. В. Ємельяненко В. І. **Осташко І. О.**; заявник та патентовласник

ДВНЗ „Укр. держ. хім. – техн. ун-т.” – №а200905165; заявл. 25.05.2009; опубл. 11.05.2010; Бюл. №9. *Особистий внесок здобувача: розробка конструкції та деяких технічних рішень по видаленню продуктів подрібнення.*

14. Пат. 91110 С Україна, МПК В02С 19/18. Пристрій для електрогідроімпульсного подрібнювання / Виноградов Б. В., Ємельяненко В. І. **Осташко І. О.**; заявник та патентовласник ДВНЗ „Укр. держ. хім. – техн. ун-т.” – №а200810262; заявл. 11.08.2008; опубл. 25.06.2010; Бюл. №12. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень.*

15. Пат. 106127 С Україна, МПК В02С 13/286, В02С 18/08, В02С 18/22. Відцентровий млин / Гірін О. Б., Виноградов Б. В., **Осташко І. О.** Ємельяненко В. І.; заявник та патентовласник ДВНЗ „Укр. держ. хім. – техн. ун-т.” – № а201212853; заявл. 12.11.2012; опубл. 10.10.2013; Бюл. № 19. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень та розробка конструкції.*

16. Пат. 106773 С Україна, В02С 13/14. Відцентровий млин ударної дії / Гірін О. Б., Виноградов Б. В., **Осташко І. О.**; заявник та патентовласник ДВНЗ „Укр. держ. хім. – техн. ун-т.” – № а201206487; заявл. 29.05.2012; опубл. 27.08.2013; Бюл. № 16. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень та підготовка патенту.*

17. Пат. 106780 С Україна, В02С 13/14. Відцентровий млин / Гірін О. Б., Виноградов Б. В., **Осташко І. О.**, Ємельяненко В. І.; заявник та патентовласник ДВНЗ „Укр. держ. хім. – техн. ун-т.” – № а201208908; заявл. 19.07.2012; опубл. 27.08.2013; Бюл. № 16. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень та підготовка патенту.*

18. Пат. 108288 С Україна, С08L 9/06, С08L 17/00. Гумова суміш для виготовлення нашпальних прокладок / **Осташко І. О.**, Виноградов Б. В., Ващенко Ю. М., Гірін О. Б.; заявник та патентовласник ДВНЗ „Укр. держ. хім. – техн. ун-т.” - № а201309488; заявл. 29.07.2013; опубл. 25.04.2014; Бюл. № 8. *Особистий внесок здобувача: експериментальні дослідження, та розробка рецептури гумової суміші для нашпальних прокладок рейкових шляхів.*

19. Пат. 109467 С Україна, В02С 13/14. Відцентровий млин / Гірін О. Б., Виноградов Б. В., Ємельяненко В. І., **Осташко І. О.**; заявник та патентовласник ДВНЗ „Укр. держ. хім. – техн. ун-т.” - № а201308263; заявл. 01.07.2013; опубл. 25.04.2014; Бюл. № 8. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень та підготовка патенту.*

Тези доповідей в збірках матеріалів конференцій:

20. Виноградов Б. В. Дослідження процесу подрібнення твердого залишку піролізу зношених автомобільних шин / Б. В. Виноградов, **І. А. Осташко**, В. І. Ємельяненко // IV Міжнародна науково-технічна конференція студентів аспірантів та молодих вчених «Хімія та сучасні технології», 22-24 квітня 2009 року: збірник тез доповідей. – Дні-ськ. – 2009. – С. 250. *Особистий внесок здобувача: підготовка доповіді та висвітлення результатів досліджень обладнання при подрібненні ТЗП.*

21. Виноградов Б. В. Повышение эффективности применения твердого остатка пиролиза изношенных шин в качестве наполнителя эластомерных материалов / Б. В. Виноградов, Ю. Н. Ващенко **І. А. Осташко**,

В. И. Емельяненко // I Международная научно-практическая конференция и научно-техническая выставка-форум: «Современные энерго- и ресурсосберегающие технологии. Проблемы и перспективы» тезисы (Одесса 28 сентября – 2 октября 2009) – С. 41-42. *Особистий внесок здобувача: отримання залежності властивостей гуми від дисперсності ТЗП.*

22. **Осташко І. О.** Кінетика процесу подрібнення твердого залишку піролізу зношених автомобільних шин / І. О. Осташко, Б. В. Виноградов // Тези доповід. 5 Між народ. науково-технічн. Конф. „Хімія і сучасні технології”. Т.1. Дні-вськ. – 2011. 20 – 22 квітня. С. 36. *Особистий внесок здобувача: проведення лабораторних досліджень, обробка результатів та отримання кінетичної залежності.*

23. **Осташко І. О.** Числове моделювання аеродинамічних процесів у проточній частині відцентрового млина / І. О. Осташко, Б. В. Виноградов // Тези доповід. II Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Комп’ютерне моделювання та оптимізація складних систем». Дніпро. – 2016. 1-3 листопада. – С 85-87. *Особистий внесок здобувача: провів числове моделювання аеродинамічних процесів, аналіз результатів та зробив висновки.*

24. **Осташко І. О.** Утилізація твердих залишків піролізу гумотехнічних відходів / І. О. Осташко, Б. В. Виноградов // Тези доповід. VII Між народ. науково-технічн. конф. „Хімія і сучасні технології”. Т.6. Дні-ськ. – 2015. – 27 – 29 квітня. – С. 100. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень процесу подрібнення ТЗП.*

25. Виноградов Б. В. Измельченный твердый остаток пиролиза как наполнитель эластомерных материалов. / Б. В. Виноградов, Ю. Н. Ващенко, **И. А. Осташко**, В. И. Шувалова // Эластомеры: материалы, технология, оборудование, изделия, тез. докл. 8-я Украинская с международным участием научно-техническая конференция резинщиков –Дні-вськ, 2010. – С. 117–120. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень ТЗП як замінника промислового технічного вуглецю.*

26. Б. В. Виноградов, **І. О. Осташко**, Ю. Н. Ващенко, В. И. Емельяненко // Інформаційні технології, наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я тези доповіді XVIII міжнародна наук.-прак. конфер.: – Харків, 2010. – С. 206. *Особистий внесок здобувача: розкрито суть проблеми утилізацію зношених автомобільних шин.*

27. Vynohradov B. Non-Waste Disposal of Used Automobile Tires / Borys Vynohradov, Ihor Ostashko // Advanced Engineering Forum Vol. 25– 2017. P. 157-165. ISSN: 2234-991X. DOI: 10.4028. *Особистий внесок здобувача: числове математичне дослідження з визначенням технологічних характеристик відцентрового млина при подрібненні твердого залишку піролізу*

АНОТАЦІЯ

Осташко І. О. Обґрунтування параметрів відцентрового млина та процесів подрібнювання твердих залишків піролізу зношених шин. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.13 – машини та апарати хімічних виробництв. Виконана у

Державному вищому навчальному закладі «Український державний хіміко-технологічний університет». Захист в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2019.

Дисертація присвячена науковому вибору, розробці та обґрунтуванню основних параметрів розмельного обладнання для подрібнення твердого залишку піролізу зношених автомобільних шин та дослідженню раціонального використання подрібненого продукту як замітника промислового технічного вуглецю.

Розроблено та запатентовано нову конструкцію відцентрового млина, а також ряд технічних рішень з його удосконалення. Проведено ряд експериментальних досліджень впливу конструктивних та технологічних параметрів на процес подрібнення. Розроблена методика розрахунку споживаної потужності на процес подрібнення, що враховує геометрію робочого органу, кутову швидкість його обертання, середній діаметр часток матеріалу у помольній камері. Методами числового аналізу проведено дослідження розподілу полів швидкостей і траєкторій потоків гетерогенного середовища та визначено залежність гранулометричного складу частинок на виході з млина від геометричних параметрів його проточної частини. Підтверджено ефективність використання подрібненого твердого залишку піролізу як замітника промислового технічного вуглецю в рецептурі для виготовлення нашпальних прокладок рейкових шляхів.

Ключові слова: відцентровий млин, твердий залишок піролізу, споживана потужність, кінетика подрібнення, числове моделювання, замітник технічного вуглецю, ресурсоенергозбереження.

АННОТАЦИЯ

Осташко И. А. Обоснование параметров центробежной мельницы и процессов измельчения твердых остатков пиролиза изношенных шин. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.13 – машины и аппараты химических производств. Выполнена в Государственном высшем учебном заведении «Украинский государственный химико-технологический университет». Защита в Национальном техническом университете Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», МОН Украины, Киев, 2019.

Диссертация посвящена научному выбору, разработке и обоснованию основных параметров размольного оборудования для измельчения твердого остатка пиролиза изношенных автомобильных шин и исследованию рационального использования измельченного продукта как заменителя промышленного технического углерода.

Полученные экспериментальные данные по удельным энергозатратам на процесс измельчения твердого остатка пиролиза (ТОП) изношенных автомобильных шин помольным оборудованием, реализующим различные механизмы разрушения материала. Показано, что наименьшие удельные

энергозатраты на процесс измельчения достигаются в центробежной мельнице. Таким образом, установлено, что для измельчения ТОП целесообразным является использование центробежной мельницы, реализующей ударно-стирающий механизм разрушения ТОП.

Для запатентованной конструкции центробежной мельницы и рабочего органа разработана методика определения потребляемой мощности на процесс измельчения и выбора мощности двигателя при различных режимах работы. Установлено, что потребляемая мощность в процессе измельчения линейно зависит от частоты вращения рабочего органа, и пропорциональна средней крупности твердых частиц, в степени 0,3.

С целью определения надежности работы рабочего органа решалась задача напряженно-деформированного состояния. Система стационарных дифференциальных уравнений напряженно-деформированного состояния для изотропного материала, которая включает уравнения движения и равновесия, геометрическое уравнение - тензор бесконечно малых деформаций (Эйлера или Лагранжа), и физическое уравнение - обобщенный закон Гука. Показано влияние особенностей геометрической конструкции и параметров рабочего органа на максимальное напряжение в критическом сечении. По результатам решения задачи определена предельная частота вращения рабочего органа из условия прочности.

Для выявления резонансных режимов работы и особенностей процесса пуска мельницы использовалась система обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающая динамические процессы в приводе мельницы.

Разработана математическая модель динамики привода, которая кроме времени пуска мельницы позволяет определить динамические нагрузки в механической системе и выбрать его рациональные параметры. Показано влияние степени загрузки мельницы на время пуска.

Установлены закономерности кинематики потока гетерогенной среды в помольной камере мельницы, взаимодействия его с рабочим органом и классификации измельченного материала при удалении с помольной камеры, проведено исследование газодинамики процессов в проточной части центробежной мельницы. Газодинамические процессы в сжимаемой среде проточной части центробежной мельницы описывались системой нестационарных уравнений неразрывности, Навье-Стокса, энергии и уравнения состояния в приближении модели турбулентности.

Анализ результатов математического моделирования процессов в рабочей камере показал, что поток воздуха осуществляет сложное вращательное движение в продольном и поперечном сечениях с образованием локальных зон повышенной турбулентности. В результате численного моделирования и анализа результатов выявлено, что в области рабочего органа в поперечном сечении воздушные потоки можно разделить на три группы, а именно: потоки перед рабочим органом, которые охватывают зону на расстоянии 15-20 мм перед рабочим органом; потоки за рабочим органом, охватывающих зону на расстоянии 60-70 мм за рабочим органом; относительно невозмущенные потоки. Средняя скорость потока материала в зоне бильных элементов составляет 12,6 м/с, а линейная скорость рабочего органа 68,72 м/с. Таким образом, относительная скорость столкновения потока материала с бильными

элементами составляет 56 м/с, то есть 81,5 % от скорости вращения рабочего органа. Установлено, что скорость столкновения потока воздуха и твердых частиц с бильными элементами рабочего органа может быть аппроксимирована линейной функцией с коэффициентом детерминации 0,99.

Ключевые слова: центробежная мельница, твердый остаток пиролиза, потребляемая мощность, кинетика измельчения, численное моделирование, заменитель технического углерода, ресурсоэнергосбережение.

ANNOTATION

Ostashko I. O. Justification of the parameters of the centrifugal mill for the grinding of solid residues of pyrolysis of worn tires. - On the rights of the manuscript.

Thesis for Ph.D. degree of technical sciences in the specialty 05.05.13 – Machinery and apparatus for chemical production. Completed at the Ukrainian State University of Chemical Technology. Protection. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2017.

The dissertation is devoted to the scientific choice, development and substantiation of the basic parameters of milling equipment for crushing the solid residue of pyrolysis of worn tires, as well as research on the rational use of the crushed product as a substitute for industrial technical carbon

A new design of the centrifugal plant has been developed and patented, as well as a number of technical solutions for its improvement. A series of experimental studies on the influence of structural and technological parameters on the grinding process have been carried out. The method of calculating energy consumption for the grinding process, which takes into account the geometry of the working organ, angular velocities of its rotation, the average diameter of particles in the grinding chamber, is developed. Methods of numerical analysis conducted research that allowed us to obtain the field distribution of velocities and trajectories of flows of heterogeneous environments and to determine the dependence of size distribution of particles from the issue of the mill on the geometrical parameters part flow was confirmed efficiency crushed solid residue of pyrolysis as a substitute for industrial carbon black in the composition for the manufacture of drain railroad pads.

Keywords: centrifugal mill, solid residue of pyrolysis, power consumption, kinetics of grinding, numerical simulation, technical carbon substitute, resource and energy saving.